

大功率整流电路直流侧非特征谐波的分析

王磊, 刘小宁, 王伟利

(中国科学院等离子体所电源室, 安徽 合肥 230031)

摘要: 当前大功率高稳定度电源仍然采用晶闸管相控整流技术, 但是在实际运行中总是存在一定的低次谐波分量, 给滤波器的选择以及谐波抑制造成一定的困难。因此有必要对谐波产生的机理及其含量有一个准确的认识。利用用于对整流设备稳态工作进行谐波分析的开关函数法对整流器在几种非理想情况下的直流侧非特征谐波进行了分析, 从而得出了在各种不同运行情况下直流侧非特征谐波的具体表达式。推导的结论为以后的谐波抑制提供理论依据和计算基础。同时对于高压直流输电谐波分析也具有参考意义。

关键词: 整流器; 开关函数; 谐波分析; 非特征谐波

Abnormal harmonic analysis of DC side in high power rectifying system

WANG Lei, LIU Xiao-ning, WANG Wei-li

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Line-commutated converters are widely used to acquire highly-stability power supply at the present time. But there inescapably exists some low order harmonics in DC side during its operation, which are regarded as abnormal harmonics, and makes the choosing and designing of the filter difficult. It is essential to realize the yield mechanics of the abnormal harmonics. In this paper, the method which is based on the switching function is used to analyse the harmonic of the rectifier under stable state. By this method, abnormal harmonics which occur under some non-ideal operating condition, such as the firing angle is delayed, the voltage in the AC side is distorted by the harmonic or by the unbalanced parameter of the apparatus, can be analyzed. Further more, the expression of the low order harmonics can be acquired in different operating conditions. So the component of the abnormal harmonic in the out voltage can be calculated. Based on the conclusion which supplies the theoretic verity, harmonic restraining and the design of the filter will be easy. And the conclusions play a very important role in analyzing harmonic in the DC side of HVDC system.

Key words: rectifier; switching function; harmonic analysis; abnormal harmonic

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)03-0037-04

0 引言

大功率高稳定度电源是一种非常重要的电源。十一五期间国家即将建设的重大科学工程强磁场科学装置功率高达数千千瓦, 而其对于直流侧的纹波电流要求限制在10 ppm左右。现阶段由于线性电源的低效率和全控型器件容量、价格的限制, 晶闸管相控整流电源仍然是大功率稳定电源应用的优先选择。然而在实际运行中直流侧会出现非特征谐波, 尤其以低次谐波最甚, 造成了滤波器的选择、保证输出稳定度的困难。因此有必要对其直流侧非特征谐波产生的机理有一个准确的认识^[1,2]。以典型的三相桥式可控整流器为对象, 分析其直流侧特征谐波的方法较为普遍, 但是如何分析非特征谐波却存在不同的认识。文献[8]分别就交流系统电压不平

衡、换流变压器三相参数不等、或触发脉冲间隔不均匀等情况下的非特征谐波计算问题进行了研究, 其分析过程相当复杂。文献[3,4]所提出的数学模型或分析方法都不能同时计及上述三种因素影响。

本文通过引入用于整流设备稳态工作进行谐波分析的开关函数法进而定性定量地分析非理想情况下的直流侧非特征谐波, 为以后的谐波消除和抑制提供理论依据和计算基础。

1 整流器开关函数的描述

为了便于分析整流器的工作特性, 有多种对于整流器的模型建立。在理想情况下, 可认为交流电源是三相对称工频正弦波电压, 忽略供电电源自身的谐波, 同时也不考虑六脉动桥式整流电路换相重叠角的影响。则整流器的开关函数波形见图 1

所示。文献[5]借助开关函数法对理想情况下的谐波进行分析，但是并没有涉及到非理想的运行情况。

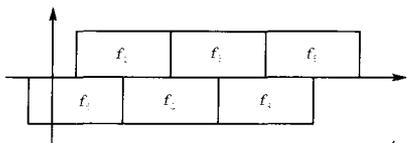


图1 整流电路的开关函数波形

Fig.1 Switching function waveform of rectifier

当装置处于稳定工作状态时，三相电源电压表示为

$$u_i = \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \sqrt{2}U_m \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

对于图1所示的六脉动开关函数，其傅里叶级数为：

$$f_n = \frac{1}{3} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2}{k\pi} \cdot \sin \frac{k\pi}{3} \cdot \cos n(\omega t - \alpha - \frac{(2n+1)\pi}{6}) \quad (2)$$

其中： $n=1\sim 6$ ，分别代表这6个开关函数的序号。

整流装置的工作波形就是由开关函数调制交流电压或交流电流的结果。输出电压 u_d 是由开关函数 $f_1 \sim f_6$ 调制输入三相交流电压 u_a 、 u_b 、 u_c 而形成的。即

$$u_a = (f_1 - f_4)u_a + (f_3 - f_6)u_b + (f_5 - f_2)u_c \quad (3)$$

将(1)、(2)两式代入式(3)，即可得输出电压 u_d 的谐波表示式：

$$u_d = \frac{3\sqrt{6}}{\pi}U_m \cos \alpha + \frac{3\sqrt{6}}{\pi}U_m \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(6k \pm 1)} \cos 6k(\omega t - \alpha) \quad (4)$$

上式中第一项为输出电压中的直流分量，第二项为各次谐波分量之和。由输出电压表达式可见整流

当 $n = 2k$ 时，输出电压表达式中包含下列谐波分量：

$$\frac{\sqrt{6}}{\pi}U_m \sin n\delta \left\{ \cos[(n+1)\omega t - n(\frac{2\pi}{3} + \delta + \alpha) + \frac{\pi}{3}] + \cos[(n-1)\omega t - n(\frac{2\pi}{3} + \delta + \alpha) - \frac{\pi}{3}] \right\} \quad (7)$$

由上式可知：对应一个具体的偶数 $2k$ ，将会在直流侧产生 $2k \pm 1$ 次的奇次谐波。所以直流侧的任何一个奇次谐波 $2k + 1$ 都可以视为由 $n = 2k$ 和 $n = 2k + 2$ 时产生谐波的合成，其表达式如下：

$$-\frac{\sqrt{6}}{2k\pi}U_m \sin 2k\delta \cos[(2k+1)\omega t - 2k(\frac{2\pi}{3} + \delta + \alpha) + \frac{\pi}{3}] + \frac{\sqrt{6}}{(2k+2)\pi}U_m \sin(2k+2)\delta \cos[(2k+1)\omega t - (2k+2)(\frac{2\pi}{3} + \delta + \alpha) - \frac{\pi}{3}]$$

器的直流侧仅仅含有 $6k$ 倍的谐波。可见，以开关函数描述的整流器模型是正确的。

2 整流器触发信号不对称时直流侧非特征谐波分析

整流器的相控触发电路常因外界的干扰和影响难以保证所有的触发信号绝对对称^[6]。如某一个的触发信号偏离正常值，则整流的直流侧中必然含有一系列的低次谐波，以图2为例，利用开关函数法对其直流侧谐波进行分析。这里我们假设晶闸管1滞后于正常 2δ 的角度，则其开关函数波形可见图2所示。

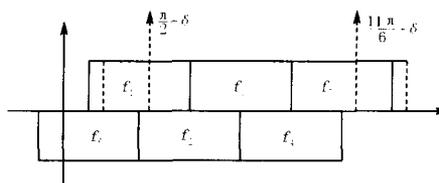


图2 整流电路中某一触发信号滞后 2δ 角的开关函数波形
Fig.2 Switching function waveform of rectifier when one firing signal delay 2δ degree

由上图可知，如果某一个晶闸管的触发角滞后，6个开关函数中只有它的上一个开关和其自身的函数发生了相应的变化，而其余的并没有任何变化。将开关函数进行傅里叶级数分解可知：

$$f_1 = (\frac{1}{3} - \frac{\delta}{\pi}) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k\pi} [\sin k(\omega t - \alpha - \frac{\pi}{6} - 2\delta) + \sin k(\frac{5}{6}\pi - \omega t + \alpha)] \quad (5)$$

$$f_5 = (\frac{1}{3} + \frac{\delta}{\pi}) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k\pi} [\sin k(\omega t - \alpha - \frac{3\pi}{2}) + \sin k(\frac{1}{6}\pi - \omega t + \alpha + 2\delta)] \quad (6)$$

其余4个的开关函数如公式(2)。联立式(1)~(3)、(5)~(6)我们可知 u_d 的具体表达式。

化简可知其最终的表达式为： $U_{2k+1} = M_{2k+1} \cos[(2k+1)(\omega t - \alpha - \delta - \frac{2\pi}{3}) - \gamma]$

$$M_{2k+1} = \frac{\sqrt{6}U_m}{\pi} \sqrt{\left(\frac{\sin(2k+2)\delta}{2k+2}\right)^2 + \left(\frac{\sin 2k\delta}{2k}\right)^2 - \frac{2\sin 2k\delta \sin(2k+2)\delta}{2k(2k+2)} \cos 2(\alpha + \delta)}$$

$$\gamma = \arctan\left[\frac{2k \sin(2k+2)\delta + (2k+2) \sin 2k\delta}{2k \sin(2k+2)\delta - (2k+2) \sin 2k\delta} \tan(\alpha + \delta)\right]$$

当 $n = 2k + 1$ 为奇数时，输出电压表达式中包含下列谐波分量：

$$(-1)^{k+2} \frac{2\sqrt{6}U_m}{\pi} \left\{ \begin{aligned} &\frac{\cos n\delta}{2} \cos[(n+1)(\alpha + \frac{\pi}{3}) - n(\alpha + \delta)] + \cos \frac{(n+1)\pi}{6} \cos[(n+1)(\alpha - \frac{\pi}{6}) - n\alpha] \\ &+ \frac{\cos n\delta}{2} \cos[(n-1)(\alpha + \frac{\pi}{3}) - n(\alpha + \delta)] + \cos \frac{(n-1)\pi}{6} \cos[(n-1)(\alpha - \frac{\pi}{6}) - n\alpha] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

将上式化简可知：对应一个具体的奇数 n 谐波。且谐波的表达式如下式所示：
 $2k + 1$ ，将会在直流侧产生 $2k$ 、 $2k + 2$ 次的偶次

$$(-1)^{k+2} \frac{\sqrt{6}}{\pi} U_m \sqrt{\cos^2(n\pm 1) \frac{\pi}{6} + 4\cos^2 n\delta - 4\cos(n\pm 1) \frac{\pi}{6} \cos[(n\pm 1) \frac{\pi}{2} - n\delta]} \cdot \cos[(n\pm 1)(\alpha + \frac{\pi}{12}) - n(\alpha + \frac{\delta}{2}) + \gamma]$$

$$\text{其中: } \gamma = \arctan\left[\frac{2\cos(n\pm 1) \frac{\pi}{6} + \cos n\delta}{2\cos(n\pm 1) \frac{\pi}{6} - \cos n\delta} \tan\left((n\pm 1) \frac{\pi}{4} - \frac{n\delta}{2}\right)\right]$$

所以直流侧的任何一个偶次谐波 $2k$ 都可视为由 $n = 2k + 1$ 和 $n = 2k - 1$ 时产生谐波的合成。如令 $\delta = 0$ ，则整流器工作于理想情况，将 $\delta = 0$ 代入式 (7) 和式 (8) 中可知直流侧并不存在非特征谐波。所以理想运行是非理想运行的特例。

对于三相整流桥而言，直流侧各次非特征谐波占其直流侧电压平均值的百分比如表 1 所示（令谐波频率为 f ， α 为控制角， 2δ 为某一触发脉冲滞后角）。

表 1 触发脉冲不对称时非特征谐波的含量

Tab.1 Abnormal harmonics under converter asymmetrical firing angle

2δ	0°		30°		60°		75°	
	f	$2f$	f	$2f$	f	$2f$	f	$2f$
1°	0.005%	0.010%	0.295%	0.295%	0.506%	0.506%	0.563%	0.563%
2°	0.020%	0.040%	0.599%	0.599%	1.018%	0.957%	1.129%	1.129%
3°	0.046%	0.091%	0.912%	0.912%	1.534%	1.534%	1.697%	1.696%
5°	0.127%	0.253%	1.562%	1.560%	2.579%	2.576%	2.838%	2.835%

3 整流器交流侧电压不对称时的直流侧非特征谐波分析

实际运行中，整流变压器的三相阻抗可能不完全相等，这必将导致整流器的交流侧三相电压不对称。且根据国家对三相电压允许不平衡度的要求的规定：电力系统公共连接点正常运行方式下不平衡度允许值为 2%，短时间不得超过 4%。此时由于电压的不对称将会在直流侧产生一定的非特征谐波分量。且由于电压的不平衡，将造成自然换相点偏离原有固定值，此偏移角度与电压的偏移度有一定关系。假设 b 相电压高于 a 、 c 两相 k 倍的情况。

$$u_i = \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \sqrt{2}U_m \begin{bmatrix} \sin \omega t \\ k \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

从上述表达式出发，可以推导出偏移角 δ 与电压升高系数 k 的关系： $\tan \delta = \frac{k-1}{\sqrt{3}(k+1)}$ 。可见即使

在 $k=1.05$ 时，偏移角度也仅仅为 0.65° ，有上述脉冲不对称分析可以知道，在如此小的脉冲提前或滞后的情况下，其谐波成分相对较小。所以，这里我们假设触发脉冲三相完全对称。利用开关函数法进

行分析, 将 (2)、(9) 两式同时代入式 (3) 中, 其结果为:

$$u_d = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_m \cos \alpha + \frac{2\sqrt{2}(k-1)}{\pi} U_m \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{2} \sin \frac{n\pi}{3}}{n} \left[\begin{array}{l} \cos[(n-1)(\omega t - \frac{2\pi}{3}) - n\alpha] \\ - \cos[(n+1)(\omega t - \frac{2\pi}{3}) - n\alpha] \end{array} \right]$$

由上式可知, 因为交流侧电压的不对称, 将会在直流侧中产生附加的偶次谐波分量。某一相的不同电压偏移量以及不同控制角所对应的非特征谐波含量占整流电压平均值的百分比见表 2 (令基波频率为 f)。

表 2 电网电压不对称时非特征谐波的含量

Tab.2 Abnormal harmonics under symmetrical conditions

交流电 压偏移	0°		30°		60°		75°	
	2f	4f	2f	4f	2f	4f	2f	4f
0.5%	0.166%	0.033%	0.192%	0.038%	0.332%	0.066%	0.640%	0.128%
1%	0.332%	0.066%	0.383%	0.767%	0.662%	0.132%	1.271%	0.255%
2%	0.662%	0.132%	0.764%	0.153%	1.316%	0.236%	2.511%	0.502%
4%	1.316%	0.263%	1.516%	0.303%	2.597%	0.519%	4.900%	0.980%

4 交流侧电压含有谐波畸变时的直流侧非特征谐波分析

实际运行时的电网含有一定的谐波分量, 这些谐波分量通过整流器的调制都会在其直流侧产生相应的非特征谐波。可以参照文献[7]中的谐波电势的设置, 将其分解为正序和负序分量。但是其

$$u_d = U'_m \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4\sin \frac{n\pi}{2} \sin \frac{n\pi}{3}}{n\pi} \left[\begin{array}{l} \cos(n-m)\alpha + \cos[(n-m)\alpha - (n-1)\frac{2\pi}{3} - n\alpha] + \cos[(n-m)\alpha + (n-1)\frac{2\pi}{3} - n\alpha] + \\ \cos(n+m)\alpha + \cos[(n+m)\alpha - (n+1)\frac{2\pi}{3} - n\alpha] + \cos[(n+m)\alpha + (n+1)\frac{2\pi}{3} - n\alpha] \end{array} \right]$$

含 $(6k-1+m)$ 次谐波, 幅值为 $\frac{3\sqrt{3}U'_m}{|6k-1|\pi}$, 含

$(6k+1-m)$ 次谐波, 幅值为 $\frac{3\sqrt{3}U'_m}{|6k+1|\pi}$ 。

依据国家对于电网的谐波的标准, 电网中一般含有较多的 3 次谐波, 且其畸变率限制在 5% 以内。经上述分析可知, 直流侧将产生较多的 2 次、4 次非特征谐波。

5 结论

本文利用开关函数法对整流器在各种非理想情况下的直流侧非特征谐波电压进行了详细的分析, 通过分析我们可知:

1) 当触发信号不对称时, 整流器直流侧的谐波成分同时受脉冲延迟角和控制角的共同作用。尤其是当输出电压较低时, 此时控制角较大, 直流侧的非特征谐波比重随之增大。

文中并没有直接明确地采用开关函数法分析, 只是逐段分析输出电压的表达式之后, 再利用傅里叶级数分解得到最终的分析结果。令交流侧谐波为 m 次, 且其有效值为 U'_m , 则谐波电势可以分解为正序、负序两组分量, 并将其分别代入式 (3) 中, 可以发现整流器直流侧非特征谐波的表达式由两个集合所组成:

2) 当交流侧电压某一相出现一定的偏移时, 此时能够在直流侧产生偶次谐波分量, 且低次谐波成分较大。进一步的分析可知, 交流侧电压偏移相同的情况下, 整流角对非特征谐波含量的影响并不是很大。

3) 当交流侧电压因谐波影响出现畸变时, 会在直流侧产生非特征谐波, 尤其以低次谐波含量较大。

总之, 在整流器实际运行中, 必然受到多方面因素的影响。随着运行情况的差异其直流侧的非特征谐波成分含量变化也较大, 但是借助于上述的分析方法, 我们能够认清谐波产生的机理, 并能够估算出其大小, 为以后直流侧谐波的抑制奠定基础。而且对于高压直流输电的直流侧谐波分析也具有参考意义。

参考文献

- [1] 王萍, 孙雨耕, 许会军, 等. 逆变器直流侧谐波分析与有源补偿[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (14): 52-56.

(下转第 65 页 continued on page 65)

善措施。

参考文献

- [1] 王金萍,樊凤林,等.安全性评价在电力企业中的应用研究[J].华北电力技术,2005,(5):23-26.
WANG Jin-ping,FAN Feng-lin, et al. Research on Security Evaluation' Application in Power Company[J].North China Power Technology, 2005, (5): 23-26.
- [2] 吉林省电力有限公司.电网调度系统安全性评价[M].北京:中国电力出版社,2005.
Power Limited Company of Jilin Province. Security Evaluation of Power Grid Dispatching[M]. Beijing: China Electric Power Press,2005.
- [3] 王延恒,贺家李,徐刚.光纤通信技术及其在电力系统中的应用[M].北京:中国电力出版社,2006.
WANG Yan-heng,HE Jia-li,XU Gang. Optical Fiber Communication Technology and Its Applications in Electric Power System[M].Beijing:China Electric Power Press,2006.
- [4] 陈明.风险投资项目评估指标体系研究[D].杭州:浙江大学,2004.
CHEN Ming.Analysis of the Project-evaluation Indices in Venture Capital[D].Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [5] 董丽丽.基于灰色模式识别理论的海底管道系统的路由定量风险评估[D].天津:天津大学,2003.
DONG Li-li.Submarine Pipeline Routing Risk Quantitative Assessment Based on Grey-mode Identification Theory[D].Tianjin: Tianjin University, 2003.
- [6] 曹利军,王华东.可持续发展评价指标体系建立原理与方法研究[J].环境科学学报,1998,18(5):526-532.
CAO Li-jun,WANG Hua-dong. A Study on the Principle and Method of Installation of Sustainable Development Assessment Indices[J].Acta Scientiae Circumstantiae, 1998,18(5):526-532.
- [7] 郝永红,王学萌.中国可持续发展的灰色综合评估[J].世界科技研究与发展,2002,24(1):59-63.
HAO Yong-hong,WANG Xue-meng.A Gray Comprehensive Evaluation to Sustainable Development on China[J].Research and Development of Science and Technology in the World,2002,24(1):59-63.
- [8] DL/T 547-94,电力系统光纤通信运行管理规程[S].
DL/T 547-94, The Performance Management Rules for Optical-fiber Communication of Electric Power System[S].
-
- 收稿日期:2006-07-26; 修回日期:2006-11-26
- 作者简介:
高会生(1963-),男,博士研究生,教授,研究方向为通信网的管理和安全风险评估、信息处理; E-mail: sunyiqun777@126.com
孙逸群(1981-),男,硕士研究生,助理工程师,研究方向为电力通信系统安全风险评估,曾从事电力自动化运行维护工作;
冉静学(1981-),男,硕士研究生,研究方向为电力通信系统安全风险评估。
-
- (上接第40页 continued from page 40)
- WANG Ping, SUN Yu-geng, XU Hui-jun, et al. Harmonic Analysis and Active Compensation for the DC-link of Inverter[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(14): 52-56.
- [2] 李战鹰,任震.基于三脉波模型的高压直流输电系统直流侧谐波分析及滤波方案设计[J].继电器,2004,32(23):15-17.
LI Zhan-ying, REN Zhen. DC Side Harmonic Analysis and Filter Scheme Design Using the Three-pulse Model in HVDC System[J].Relay, 2004,32(23):15-17.
- [3] 游林儒,王炎,毕淑娥.可控整流器在非理想运行条件下的谐波分析[J].电力电子技术,2000,34(3):9-10.
YOU Lin-ru, WANG Yan, BI Shu-e. Harmonic Analysis of Rectifier Under Nonideal Operating Conditions[J]. Power Electronics, 2000, 34(3):9-10.
- [4] Emanuel A E, Orr JA, Emanuel A E. Six-Pulse Converter Atypical Harmonics Caused by Second Harmonic Voltage[A]. In:10th International Conference on Harmonics and Quality of Power[C].2002.340-346.
- [5] 李裕能.开关函数法用于变流装置的谐波分析[J].电网技术,2000,24(6):18-20.
L I Yu-neng. Harmonic Analysis of Applying Switching Function Method to Current Converter[J]. Power System Technology,2000,24(6):18-20.
- [6] 荆勇,任震,欧开健.天广直流输电系统换相失败的研究[J].继电器,2003,31(10):32-36.
JING Yong, REN Zhen, OU Kai-jian. Research on Commutation Failure in Tian-Guang HVDC Transmission System[J].Relay, 2003,31(10):32-36
- [7] Galloway J. Harmonic Instability in Phase Controlled Rectifiers[A].In:Industry Applications Society 46th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference[C]. 1999.171-175.
- [8] 夏道止,沈赞坝.高压直流输电系统的谐波分析及滤波[M].北京:水利电力出版社,1994.
XIA Dao-zhi, SHEN Zan-xun. Harmonic Analysis and Filter in HVDC System[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press,1994.
-
- 收稿日期:2006-08-07; 修回日期:2006-10-12
- 作者简介:
王磊(1978-),男,博士研究生,研究方向为大功率变流技术; E-mail:lwang@ipp.ac.cn
刘小宁(1962-),男,研究员,博士生导师,主要研究领域为大功率变流技术和脉冲功率技术;
王伟利(1982-),男,硕士研究生,研究方向为大功率变流技术。